

(2) 0409 0228 0



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 41 38 798 A 1**

⑤1 Int. Cl. 5:  
**H 04 L 1/20**  
H 04 L 1/24  
// H 04 L 25/03

⑳ Aktenzeichen: P 41 38 798.8  
㉑ Anmeldetag: 26. 11. 91  
㉒ Offenlegungstag: 27. 5. 93

DE 41 38 798 A 1

㉑ Anmelder:  
Daimler-Benz Aktiengesellschaft, 7000 Stuttgart, DE

㉒ Erfinder:  
Brakemeier, Achim, Dr.-Ing., 7900 Ulm, DE

⑤6 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit  
in Betracht zu ziehende Druckschriften:  
DE 40 01 592 A1

⑤4 Verfahren zur Schätzung der Kanalstoßantwort eines Übertragungskanals

⑤7 Zur Schätzung der Kanalstoßantwort eines Übertragungskanals wird ein Verfahren vorgeschlagen, welches weitgehend beliebige Folgen als periodisch fortgesetzte Schätzfolgen in einer Präambel zuläßt und in einer zweistufigen Vorgehensweise mit einem Korrelationsfilter und einer nachfolgenden Korrektur-Filterbank eine genaue Schätzung der Kanalstoßantwort ermöglicht. Besondere Vorteile ergeben sich bei gegenüber der Periodenlänge der Schätzfolge kürzerer Kanalstoßantwortlänge.

DE 41 38 798 A 1

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Schätzung der Kanalstoßantwort eines Übertragungskanals nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

Bei der digitalen Nachrichtenübertragung, insbesondere über Funkkanäle wie z. B. ionosphärische Kurzwellenkanäle oder im Mobilfunk, sind die in einem Empfänger aufgenommenen Empfangssignale gegenüber den der Übertragung am Sender zugrunde liegenden Datensymbolen verzerrt. Die verzerrenden Eigenschaften des Übertragungskanals können durch eine Kanalimpulsantwort beschrieben werden, die aber a priori nicht bekannt ist. Da zur Entzerrung der Empfangssignale die Kenntnis der Kanalstoßantwort notwendig ist, kommt der möglichst genauen Schätzung der Kanalstoßantwort hierbei eine besondere Bedeutung zu.

Gebräuchlich ist, in den Datenstrom Schätzfolgen mit empfängerseitig vorbekannten Symbolfolgen, z. B. als sogenannte Präambeln einzufügen. Diese Schätzfolgen können im Empfänger erkannt und zur Schätzung herangezogen werden. Bevorzugt eingesetzt werden Pseudo-Noise (PN)-Folgen für die Schätzfolgen.

Durch die Korrelation der Empfangssignale in einem Korrelationsfilter kann eine Schätzung der Kanalstoßantwort vorgenommen werden. Während bei Einsatz eines Matched-Filters als Korrelationsfilter ein hoher Integrationsgewinn mit einem ungünstigen Verhalten der Nebenwerte verbunden ist, erkaufte das Mismatched-Filter sich die verschwindenden Nebenwerte der Korrelationsfunktion mit einer geringen Effizienz.

In der DE 39 08 942 ist ein Verfahren zur Bestimmung der Kanalstoßantwort eines Übertragungskanals beschrieben, bei welchem periodisch fortgesetzte PN-Folgen übertragen und die abgetasteten Empfangssignale im Empfänger einer zyklischen Korrelation unterzogen werden. Die Ausgangssignale dieser zyklischen Korrelationsstufe werden unter Hinzufügen eines aus den Filterausgangssignalen zu jedem Taktschritt neu abgeleiteten Korrekturglieds rekursiv erneuert. Damit ist bei hoher Effizienz eine genaue Schätzung der Kanalstoßantwort möglich. Dieses bekannte Verfahren ist aber auf den Einsatz von PN-Folgen eingeschränkt.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, ein Verfahren zur Schätzung der Kanalstoßantwort eines Übertragungskanals anzugeben, welches weitgehend beliebige Folgen als Schätzfolgen zuläßt.

Die Erfindung ist im Patentanspruch 1 beschrieben. Die Unteransprüche enthalten vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung.

Zusätzlich zu dem Vorteil der weitgehend freien Wahl der Schätzfolgen bietet die Erfindung die Möglichkeit, bei der mit Korrelationsfilter und Korrekturmatrix zweistufigen Schätzung der Kanalstoßantwort die Korrelationsfolge und die Korrekturmatrix so zu gestalten, daß eine hohe Effizienz vorliegt, woraus eine gute Resistenz gegen additive Signalstörungen (Rauschen) resultiert. In vielen Fällen vorteilhaft ist dabei, als Korrelationsfilter ein Matched-Filter zu der Schätzfolge einzusetzen. Für die Gestaltung der Korrekturmatrix kann vorteilhaft eine eventuelle Vorkennntnis über Nullstellen in der verzögerungsabhängigen Kanalimpulsantwort, insbesondere die Kenntnis einer gegenüber der Periodenlänge der Schätzfolge kürzeren Kanalstoßantwortlänge ausgenutzt werden. Hierbei ergeben sich in der Dimension deutlich reduzierte Matrizen, die den Signalverarbeitungsaufwand und Störungen reduzieren.

Die Erfindung ist nachfolgend anhand von Beispielen

noch eingehend erläutert.

Es sei eine Schätzfolge der Länge  $N$  als Vielfachen der Symboldauer mit den Symbolen  $x_i$  angenommen. Eine in die Datenübertragung eingefügte Präambel enthält diese Schätzfolge in periodisch fortgesetzter Form, so daß empfängerseitig eine zyklische Korrelation möglich ist. Die Präambel besteht aus mindestens  $N + 2 \cdot N_h$  Symbolen mit  $N_h$  als Länge der Kanalstoßantwort. Die Eigenschaften des Übertragungskanals seien durch eine Kanalstoßantwort mit verzögerungsabhängigen Werten  $h_n$  beschrieben. Die Abtastwerte  $y_k$  der Empfangssignale lassen sich dann durch zyklische Faltung der Kanalstoßantwort und der Schätzfolge darstellen. Die zyklische Korrelation der Empfangssignale im Korrelationsfilter kann als zyklische Faltung der Abtastwerte  $y_k$  mit den Koeffizienten  $w_m$  des Korrelationsfilters beschrieben werden.

Soweit im folgenden auf eine mathematische Beschreibung der Signalverarbeitungsschritte zurückgegriffen wird, ist eine Darstellung der einzelnen Größen in Tensorschreibweise gewählt. Der Übergang von einem eindimensionalen Tensor zu einem äquivalenten zweidimensionalen Tensor (Matrix) mittels einer Töplitz-Operation, z. B. für die Schätzfolge

$$x_k^n = \sum_i x_i \delta_i^n$$

mit  $\delta_k^n$  als mehrdimensionalem zyklischem Einheitstensor (Töplitzoperator) wird als allgemein bekannt vorausgesetzt. Die Tensordarstellung mit kovarianten Indices (tiefgestellt) und kontravarianten Indices (hochgestellt) ist der Darstellung durch Vektoren und Matrizen äquivalent, bietet aber teilweise Vorzüge bei Verknüpfungsoperation. Die Ausführung der Signalverarbeitung wird durch die Art der Darstellung nicht berührt. Soweit nicht anders angegeben, haben die Tensoren im Beispielfall in jeder Dimension die Länge  $N$ .

Die Folge der Abtastwerte  $y_k$  der Empfangssignale kann dann in äquivalenter Weise als Töplitzmatrix  $y_j^m$  dargestellt werden. Die zyklische Korrelation wird durch Multiplikation des Korrelationsfilters  $w_m$  mit dieser Matrix  $y_j^m$  durchgeführt. Es ergibt sich das Ausgangssignal  $g_j$  des Korrelationsfilters.

Dieses Ausgangssignal stimmt im allgemeinen Fall noch nicht mit der Kanalstoßantwort überein und wird daher zur richtigen Schätzung der Kanalstoßantwort mit einer Korrekturmatrix  $f_l^j$  multipliziert zu

$$p_l = \sum_j g_j \cdot f_l^j \text{ mit } g_j = \sum_m w_m \cdot y_j^m$$

Daraus ergibt sich die konkrete Aufgabe, ein Korrelationsfilter  $w_m$  und eine Korrekturmatrix  $f_l^j$  unabhängig von einer aktuellen Kanalstoßantwort so zu bestimmen, daß das Multiplikationsergebnis  $p_l$  mit der Kanalstoßantwort übereinstimmt. Das Korrelationsfilter und die Korrekturmatrix sind voneinander und von der eingesetzten Schätzfolge  $x_i$  abhängig. Es können aber entweder das Korrelationsfilter oder die Korrekturmatrix frei gewählt und auf diese Weise die Eigenschaften der Signalverarbeitung beeinflußt werden. Es läßt sich zeigen, daß die beschriebene Vorgehensweise eine richtige Schätzung der Kanalstoßantwort liefert, wenn die Korrekturmatrix  $f_l^j$  der inverse Tensor zu einer Korrelationsmatrix  $r_j^n$  ist, die durch die Töplitzmatrix der

Kreuzkorrelationsfunktion aus Schätzfolge  $x_i$  und Korrelationsfilter  $w_m$  gegeben ist zu

$$r_j^n = \sum_{i,m} w_m \cdot x_i \cdot \delta_j^{i,m,n}$$

mit  $\delta_j^{i,m,n}$  als zyklischem Einheitstensor mit der Eigenschaft

$$\delta_j^{i,m,n} = \begin{cases} 1 & \text{für } i + m + n = j \text{ Mod } N \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases}$$

Aus dem Zusammenhang über die Matrixinversion

$$\sum_j f_j^i \cdot r_j^n = \delta_i^n$$

können bei gegebener Schätzfolge  $x_i$  Korrelationsfilter  $w_m$  und Korrekturmatrix  $f_j^i$  in gegenseitiger Abhängigkeit so gewählt werden, daß das Multiplikationsergebnis  $p_i$  mit der gesuchten Kanalimpulsantwort übereinstimmt.

Die Korrekturmatrix kann auch als Filterbank mit  $N$  Korrekturfiltern für die bei der zyklischen Korrelation im Korrelationsfilter gebildeten noch fehlerhaften Werte  $g_j$  angesehen werden, wobei für jeden Wert  $g_j$  ein spezielles Korrekturfilter bereitsteht. Die Gesamtheit der Korrekturfilter bildet wiederum die Korrekturmatrix. Die Wahl von Korrelationsfilter oder Korrekturmatrix ist a priori beliebig. Vorteilhaft ist aber, für das Korrelationsfilter das Matched-Filter der Schätzfolge einzusetzen, da damit das Signal/Rauschleistungs-Verhältnis am Ausgang des Korrelationsfilters maximiert wird.

Die Erfindung ist besonders vorteilhaft für Fälle, in denen die Kanalstoßantwort deutlich kürzer ist als die Periodenlänge der periodisch fortgesetzten Schätzfolge. Aus dieser Vorkennnis über die Kanaleigenschaften folgt, daß ein Teil der  $N$  sich formal ergebenden Werte  $h_n$  der Kanalstoßantwort gleich Null gesetzt werden können. In der erfindungsgemäßen Vorgehensweise wird dies vorteilhafterweise dadurch berücksichtigt, daß die den verschwindenden Werten  $h_n$  entsprechenden gleich indizierten Zeilen und Spalten in der Korrelationsmatrix  $r_j^n$  gestrichen werden.

Bei einer Kanalstoßantwortlänge über  $Nh = M$  Symbolauern reduziert sich die Korrelationsmatrix auf die Dimension  $M \times M$ . Aus dieser neuen Matrix wird durch Inversion wie beschrieben eine ebenfalls längenreduzierte Korrektur-Teilmatrix gebildet, die durch Hinzufügen von Zeilen und Spalten, die allesamt mit Werten Null besetzt sind, zur Korrekturmatrix der Dimension  $N \times N$  ergänzt wird.

Bedeutsam ist, daß bei der erfindungsgemäßen Vorgehensweise für eine gegenüber der Periodenlänge der Schätzfolge kürzere Kanalstoßantwortlänge, d. h.  $M < N$ , die Effizienz bei der Schätzung der Kanalstoßantwort mit zunehmendem  $(N - M)$  schnell ansteigt.

Die Möglichkeit der Verringerung der Längen von Korrelationsmatrix und Korrekturmatrix gilt allgemein für die Vorkennnis, daß bestimmte Werte der Kanalstoßantwort verschwinden, ohne daß diese Werte zusammenhängend sein müssen. Von praktischer Bedeutung ist aber vor allem der geschilderte Fall, daß die Kanalstoßantwort kürzer ist als die Periodenlänge der

Schätzfolge.

Die Korrekturmatrix und der Korrelationsfilter können auch in einer einzigen als Zugriffsmatrix bezeichneten Matrix, die aus dem Matrixprodukt der Korrekturmatrix und der Töplitzmatrix des Korrelationsfilters hervorgeht, zusammengefaßt werden. Die Schätzung der Kanalstoßantwort erfolgt dann direkt durch Multiplikation der Abtastwertfolge der Empfangssignale mit dieser Zugriffsmatrix. Für die Zugriffsmatrix gilt dann aber nicht die bei zweistufiger Vorgehensweise gegebene Wahl eines Wertesatzes, z. B. des Korrelationsfilters und die Zugriffsmatrix kann im Regelfall bei  $M < N$  auch nicht in der Länge der beiden Dimensionen reduziert werden.

Die bei dem erfindungsgemäßen Verfahren als Schätzfolgen einsetzbaren Symbolfolgen sind weitgehend beliebig. Im Prinzip sind alle Folgen geeignet, deren Spektrum keine Nullstellen aufweist. Wenn  $M < N/2$  gilt, so sind auch u. U. noch Folgen zulässig, die aus zwei vollen Perioden einer kürzeren Folge bestehen.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Schätzung der Kanalstoßantwort eines Übertragungskanals durch Übertragung einer empfängerseitig vorbekannten periodisch fortgesetzten Schätzfolge und durch Korrelation des abgetasteten Empfangssignals in einem Korrelationsfilter, dadurch gekennzeichnet, daß aus dem Ausgangssignal  $g_j$  des Korrelationsfilters durch Multiplikation mit einer Korrekturmatrix  $f_j^i$  die Kanalstoßantwort  $p_i$  gemäß

$$p_i = \sum_j g_j \cdot f_j^i$$

geschätzt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Korrekturmatrix mit Elementen  $f_j^i$  invers ist zu einer Korrelationsmatrix mit Elementen  $r_j^n$ , welche gemäß

$$r_j^n = \sum_{i,m} w_m \cdot x_i \cdot \delta_j^{i,m,n}$$

von der Korrelationsfolge  $w_m$  und der Schätzfolge  $x_i$  abhängt mit  $\delta_j^{i,m,n}$  als zyklischen Einheitstensor.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß für das Korrelationsfilter das Matched-Filter zu der Schätzfolge gewählt wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Periodenlänge  $N$  der Schätzfolge größer ist als die Länge  $M$  der Kanalstoßantwort, daß zur Bildung der Korrekturmatrix für die Inversion in der Korrelationsmatrix die den verschwindenden Werten der Kanalstoßantwort entsprechenden Zeilen und Spalten gestrichen werden und die nach der Inversion vorliegende Teil-Korrekturmatrix der Dimension  $M \times M$  durch Zufügen von Zeilen und Spalten mit Werten gleich Null auf die Korrekturmatrix mit der Dimension  $N \times N$  erweitert wird.